

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ НА СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ С БОЧКОВИДНЫМИ ВАЛКАМИ

OPTIMIZATION OF PIERCING PROCESS ON SCREW ROLLING MILL WITH BARREL-SHAPED ROLLERS

Король Алексей Валентинович

ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» Адрес: 454139, Россия, г. Челябинск, ул. Новороссийская, 30. E-mail РочНИТИ: secretariat@rosniti.ru

Mathematical model of screw rolling with barrel-shaped rollers was elaborated. Minimization of machine time is Optimization criterion. System restrictions includes insure of adequate surface quality of shell.

Интенсивное развитие добычи, транспортировки и переработки энергоносителей определяет возрастающие потребности в бесшовных трубах. В связи с этим имеющиеся в России трубопрокатные агрегаты по производству бесшовных горячекатаных труб, реконструируют с установкой высокопроизводительных, мощных, высокотехнологичных прошивных 2-х валковых станов винтовой прокатки.

Увеличение производительности прошивного стана приводит к увеличению энергоемкости процесса прошивки, к ухудшению условий захвата заготовки а, следовательно, возможному понижению качества получаемых гильз. Дефекты, образующиеся при винтовой прокатке, в большинстве случаев не ликвидируются на последующих переделах. И при разработке высокопроизводительной технологии прошивки необходимо учитывать условия образования дефектов на гильзах, как по геометрическим характеристикам, так и по состоянию поверхностей.

И в данной работе рассматривается интенсификация винтовой прокатки при обеспечении удовлетворительного качества гильз.

Известно, что коэффициент осевой скорости при винтовой прокатки изменяется в достаточно широком диапазоне от 0,5 до 1, что указывает на возможность интенсификации процесса путем увеличения скорости прошивки. Это может быть достигнуто несколькими путями: изменением технологических параметров (настроечных параметров); изменением калибровки прокатного инструмента, (валков, линеек, оправок) изменением конструкции стана. Интенсификация винтовой прошивки достигается за счет изменения технологических параметров, то есть определение их оптимального сочетания. При этом надо учитывать тот факт, что изменение какого-либо параметра в ряде случаев приводит к негативному изменению других.

Поэтому для нахождения наилучшего сочетания характеристик процесса, необходимо его детальное изучение, что достигается при помощи

такого способа исследования объектов и явлений, как математическое моделирование.

Разработка математической модели прошивного стана базируется на принципах оптимального управления. Критерием оптимизации в данной работе является минимизация машинного времени прошивки.

Для станов с бочковидными валками машинное время прокатки определяется по формуле:

$$T_{\text{м}} = \frac{L_z + L_{\text{о.д.}}}{V \cdot \sin \beta \cdot \eta_o}, \quad (1)$$

где L_z — длина гильзы;

$L_{\text{о.д.}}$ — длина очага деформации;

V — средняя окружная скорость валков;

β — угол подачи;

η_o — коэффициент осевой скорости.

Эффективным способом уменьшения машинного времени, а, следовательно, и увеличения производительности прошивного стана является использование повышенных углов подачи.

Длина очага деформации, входящая в формулу (1), в свою очередь зависит от расстояния между валками в пережиме, то есть от относительного обжатия в пережиме.

Поэтому, управляющими параметрами в данной математической модели были выбраны угол подачи и обжатие в пережиме валков.

Для составления оптимального управления необходимо определить аналитически все составляющие выражения (1).

При аналитическом описании процесса прошивки было учтено изменение (искажения) очага деформации на станах винтовой прокатки с бочковидными валками, вызванного разворотом валков на угол подачи.

Выражение для определения критерия эффективности, которое является целевой функцией, зависящий от двух управляющих параметров (угол подачи, относительное обжатие перед носком оправки) имеет вид:

$$T(\beta, \varepsilon_p) = \frac{L_3 \cdot \lambda \cdot 90 + 90 \cdot \left[\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_3 \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} + \right.}{\eta_0 \cdot \pi \cdot n \cdot \sin \beta \cdot [3 \cdot R_p - \cos \beta \cdot \left[\left(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_3 \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 + \right. \right.}$$

$$\left. + \sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)} \cdot (r_s - r_3(1 - \varepsilon_p)) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} \cdot \frac{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)}{\sin^2 \beta} \right] - \left. \left(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)} \cdot (r_s - r_3(1 - \varepsilon_p)) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \right) \cdot \frac{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)}{\sin^2 \beta} \right]}$$

где α_1 - угол входного конуса валка;

α_2 - угол выходного конуса валка;

r_3 - радиус заготовки;

R_p - радиус валка в пережиме;

L_3 - длина заготовки;

ε_p - относительное обжатие в пережиме

валков;

n - частота вращения валков;

Для обеспечения качества получаемых гильз и условий захвата в математическую модель включена система ограничений процесса прошивки: условия первичного [1] и вторичного захвата [2], введения процесса прошивки при допустимом коэффициенте овализации в пережиме

$$\varepsilon_n = \varepsilon_p - \frac{\left[l_0 \cdot \sin \beta^2 - \left[\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{(R_p + r_3) \cdot (1 - \varepsilon_p)}} \cdot \left(\frac{\delta_0}{2} + S_s - r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p) \right) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \right] \cdot (R_p + r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p)) \right]^2}{2 \cdot (R_p \cdot r_3 + r_3^2 \cdot (1 - \varepsilon_p)) \cdot \sin \beta^2} -$$

$$\frac{\left[l_0 \cdot \sin \beta^2 - \left[\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{(R_p + r_3) \cdot (1 - \varepsilon_p)}} \cdot \left(\frac{\delta_0}{2} + S_s - r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p) \right) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \right] \cdot (R_p + r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p)) \right] \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{\sin \beta^2 \cdot r_3},$$

где ε_n - обжатие перед носком оправки;

l_0 - длина рабочей поверхности

оправки;

δ_0 - диаметр оправки;

S_s - толщина стенки гильзы.

Ниже представлена система ограничений процесса прошивки:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_b - \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{\pi}{2} \cdot (1+i) \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \geq 0 \\ \frac{1 - \eta}{1 - \eta} - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\left(\frac{f_b}{\sin \alpha \cos \beta} \right)^2 - 1}} \geq 0 \\ \frac{\left(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_3(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_3 \cdot \varepsilon_i - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot (R_p + r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p)) \right)}{2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \pi \cdot r_3 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \left(\frac{3,2}{V_0} + 0,05 \cdot \Delta d_p + (0,025 + 0,000135 \cdot d_3) \cdot \beta \right)} - 0,95 \geq 0 \\ 0,09 - \varepsilon_n \geq 0 \\ L_{b1} - \frac{\left(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + (r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p))}} \cdot r_3 \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \cdot (R_p + r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p))}{\sin^2 \beta} \geq 0 \\ L_{b2} - \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + (r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p))}} \cdot (r_a - (r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p))) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot (R_i + (r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p)))}{\sin^2 \beta} \geq 0 \\ 1,17 - \frac{2 \cdot r_s - \frac{\delta_0}{2} - S_s - (l_i - \tilde{n}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_i}{r_3 \cdot (1 - \varepsilon_p)} \geq 0. \end{array} \right.$$

где f_b - коэффициент трения;

η - коэффициент тангенциальной скорости;

L_{b1} - длина входного конуса вала;

L_{b2} - длина выходного конуса вала;

c - выдвигание оправки за пережим;

α_l - угол гребня линейки в зоне раскатки.

Для определения оптимальных параметров процесса прошивки, при котором достигается минимальное время прошивки для математической модели, используется градиентный метод [4].

Сущность данного метода следующая. Выбирается из заданного множества некоторое значение $x = x^1(\beta, \xi)$. Затем проверяется, выполняется ли для множества X , ограничения $f_i(x^1) \geq 0$. Если данное ограничение не выполняется, то необходимо выбирать новое

значение точки до тех пор, пока не выполнится условие по ограничению.

В точке x^1 осуществляется «планированный эксперимент», в котором функцию отклика определяют не экспериментально, а вычисляют по заданному выражению ($\dot{O}(\beta, \xi)$).

Полученные коэффициенты регрессии a_1, a_2 - приближенно являются координатами вектора градиента плоскости. Осуществляется спуск по линии градиента до некоторой точки $x^{(2)}$, в которой все повторяется, как и в точке $x^{(1)}$. Так можно достигнуть окрестности точки оптимума (если она существует).

В таблице представлен результат расчета минимального времени прошивки заготовки диаметром 410 мм в гильзу 495x30,5 мм.

Таблица – Результат расчета минимального времени прошивки

Точка из множества возможных значений управляющих параметров	Граничные условия							
	По осевому втягиванию	По условию вращения	По условию вторичного захвата для угла подачи	По условию вторичного захвата для обжатия в пережиме	По условию вскрытия полости и перед носком оправки	По условию допустимого коэффициента овализации	По условию достаточности длины бочки в конусе прошивки	По условию достаточности длины бочки в конусе прошивки
$T(\beta_0^0=4, \varepsilon_0^0=0,12)=59,2$	$0,084 > 0$	$0,31 > 0$	$0,141 > 0$	$0,016 > 0$	$0,32 > 0$	$0,02 > 0$	$42 > 0$	$15 > 0$
$T(\beta_{\min}^0=3,9, \varepsilon_{\min}^0=0,11)=61,1$	$0,084 > 0$	$0,312 > 0$	$0,142 > 0$	$0,012 > 0$	$0,38 > 0$	$0,03 > 0$	$55 > 0$	$16 > 0$
$T(\beta_{\max}^0=4,1, \varepsilon_{\min}^0=0,11)=58,1$	$0,084 > 0$	$0,312 > 0$	$0,139 > 0$	$0,012 > 0$	$0,36 > 0$	$0,03 > 0$	$58 > 0$	$17 > 0$
$T(\beta_{\min}^0=3,9, \varepsilon_{\max}^0=0,13)=61,8$	$0,084 > 0$	$0,312 > 0$	$0,144 > 0$	$0,018 > 0$	$0,28 > 0$	$0,02 > 0$	$30 > 0$	$4 > 0$
Коэффициенты регрессии: $a_0=28,64, a_1=-0,240, a_2=-9,95, \beta_0^1=6, \varepsilon_0^1=\frac{-0,240}{-9,95} \cdot 6=0,144$								
$T(\beta_0^1=6, \varepsilon_0^1=0,144)=38,6$	$0,102 > 0$	$0,295 > 0$	$0,110 > 0$	$0,044 > 0$	$0,120 > 0$	$0,01 > 0$	$68 > 0$	$25 > 0$
$T(\beta_{\min}^1=5,9, \varepsilon_{\min}^1=0,134)=39,6$	$0,102 > 0$	$0,296 > 0$	$0,110 > 0$	$0,022 > 0$	$0,148 > 0$	$0,02 > 0$	$74 > 0$	$36 > 0$
$T(\beta_{\max}^1=6,1, \varepsilon_{\min}^1=0,134)=31$	$0,102 > 0$	$0,294 > 0$	$0,106 > 0$	$0,022 > 0$	$0,140 > 0$	$0,02 > 0$	$76 > 0$	$38 > 0$
$T(\beta_{\min}^1=5,9, \varepsilon_{\max}^1=0,154)=40,9$	$0,102 > 0$	$0,296 > 0$	$0,110 > 0$	$0,057 > 0$	$0,116 > 0$	$0,01 > 0$	$67 > 0$	$12 > 0$
Коэффициенты регрессии: $a_0=69,24, a_1=-0,56, a_2=-43,0, \beta_0^2=10, \varepsilon_0^2=\frac{-0,56}{-43,0} \cdot 10=0,13$								
$T(\beta_0^2=10, \varepsilon_0^2=0,13)=26,8$	$0,125 > 0$	$0,281 > 0$	$0,0012 > 0$	$0,028 > 0$	$0,123 > 0$	$0,02 > 0$	$92 > 0$	$53 > 0$
$T(\beta_{\min}^2=9,9, \varepsilon_{\min}^2=0,12)=28,2$	$0,125 > 0$	$0,281 > 0$	$0,0012 > 0$	$0,022 > 0$	$0,123 > 0$	$0,03 > 0$	$103 > 0$	$72 > 0$
$T(\beta_{\max}^2=10,1, \varepsilon_{\min}^2=0,12)=25,6$	$0,125 > 0$	$0,281 > 0$	$0,0007 > 0$	$0,022 > 0$	$0,120 > 0$	$0,03 > 0$	$105 > 0$	$75 > 0$
$T(\beta_{\min}^2=9,9, \varepsilon_{\max}^2=0,14)=28,8$	$0,125 > 0$	$0,281 > 0$	$0,0012 > 0$	$0,035 > 0$	$0,116 > 0$	$0,01 > 0$	$79 > 0$	$40 > 0$

Таким образом, оптимальными параметрами являются угол подачи $\beta = 10,1^\circ$ и относительное обжатие в пережиме $\xi = 0,11$. Минимальное время прошивки составляет $T_{\min} = 25,66$ с. Так как интервал изменения угла подачи на прошивных станах $0,5^\circ$, примем оптимальное значение при угле $\beta = 10^\circ$ и относительном обжатии в пережиме $\xi = 0,12$. Точка с координатами $T(\beta = 10^\circ, \xi = 0,12)$ удовлетворяет граничным условиям и обеспечивает $T = 26,2$ с.

Список литературы

- 1 Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки: учебник для вузов / П.К. Тетерин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
- 2 Матвеев Ю.М. Калибровка инструмента трубных станов / Ю.М. Матвеев, Я.Л. Ваткин. – М.: Металлургия, 1970 – 480 с.
- 3 Потапов, И.Н. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
- 4 Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.